

FIG. 11-51

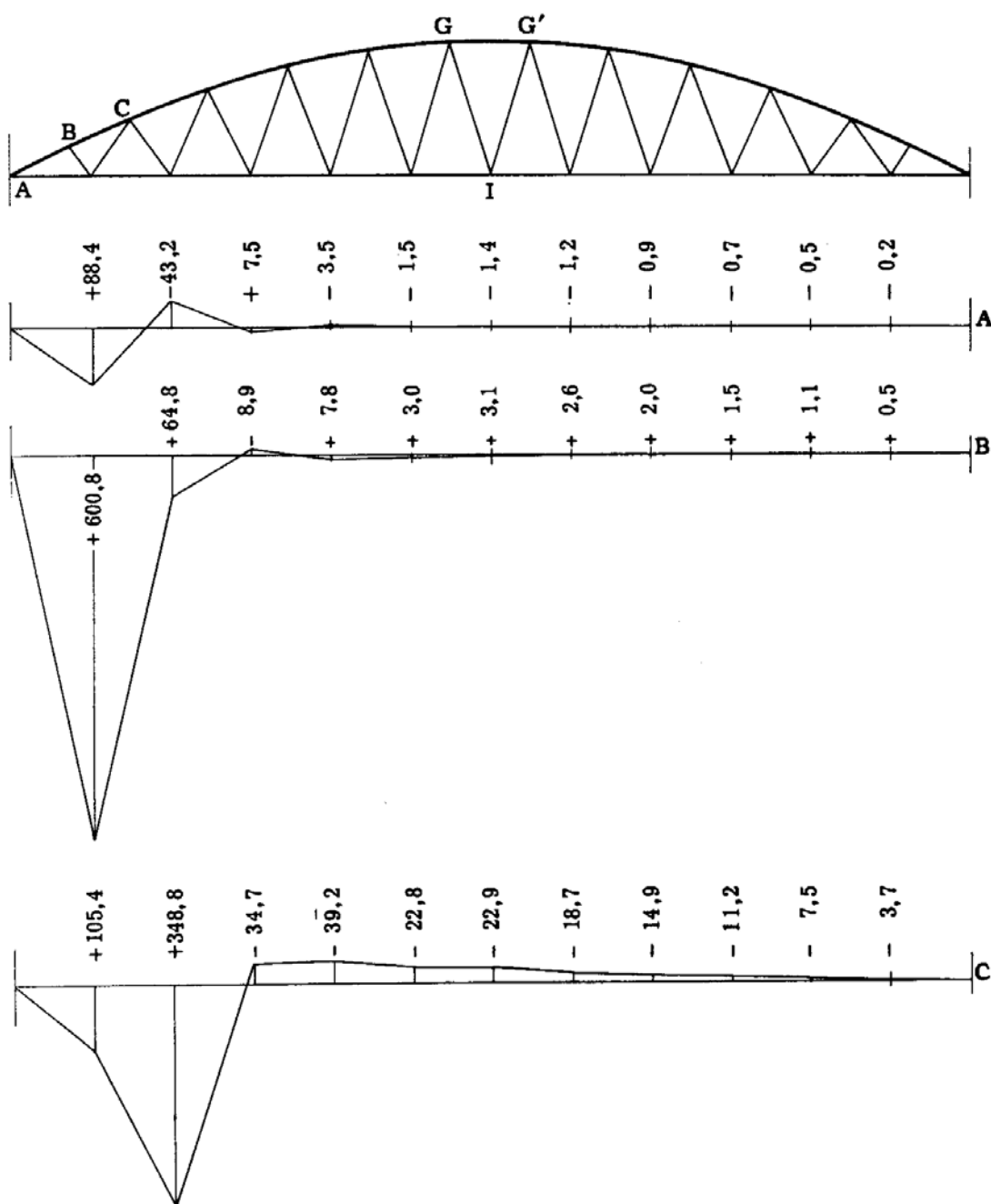


FIG. 11-52 a

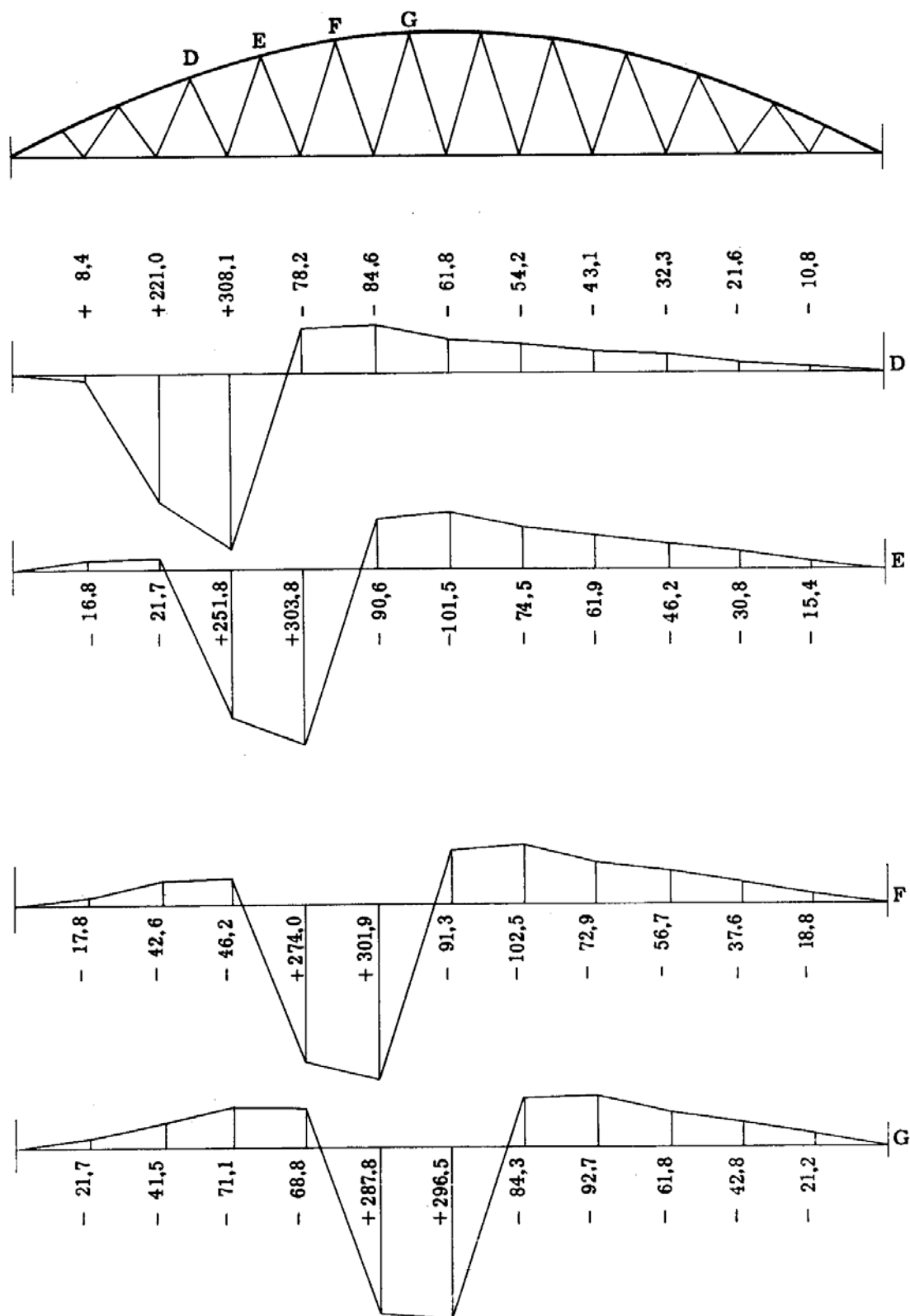


FIG. 11-52 b

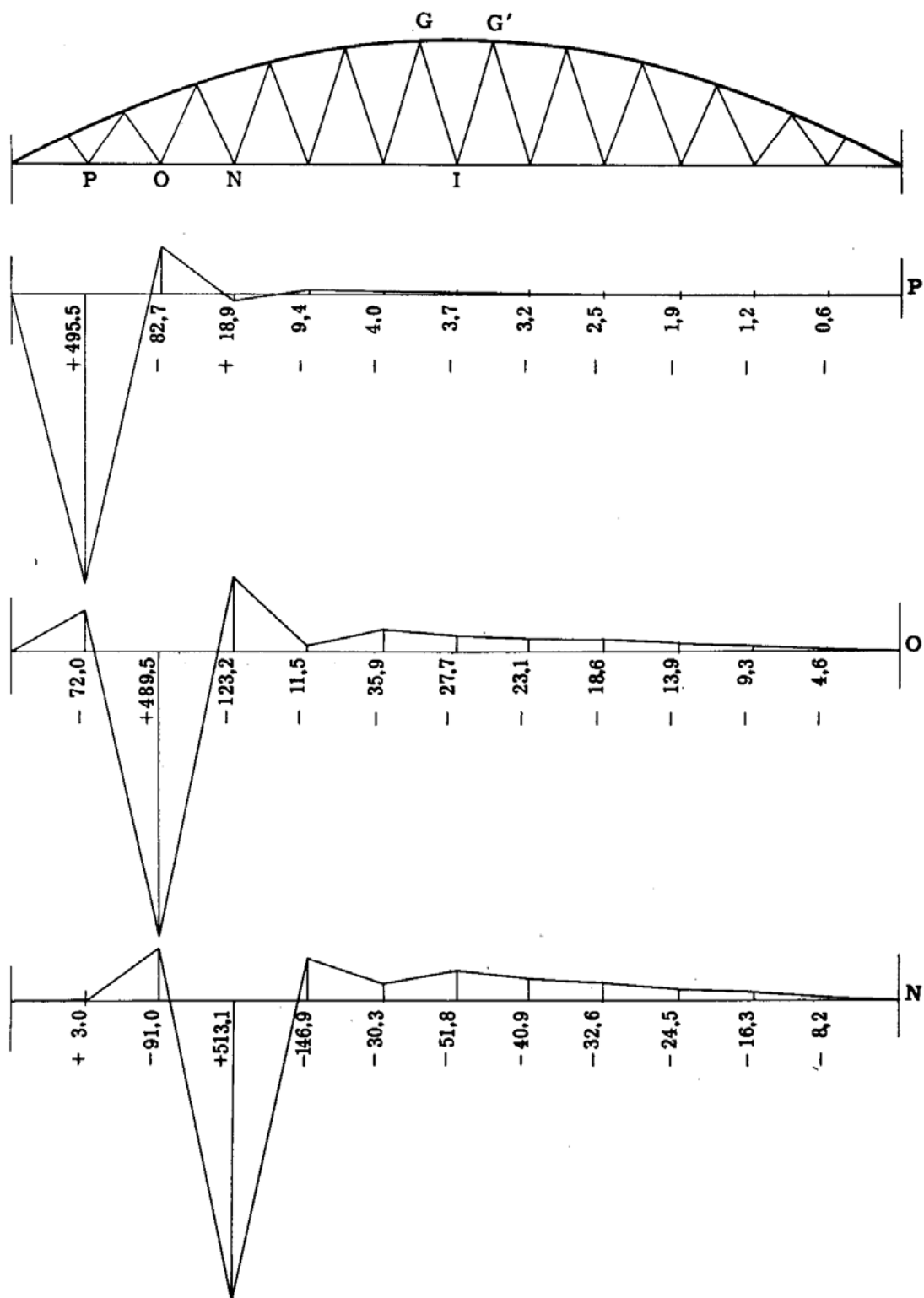


FIG. 11-52 c

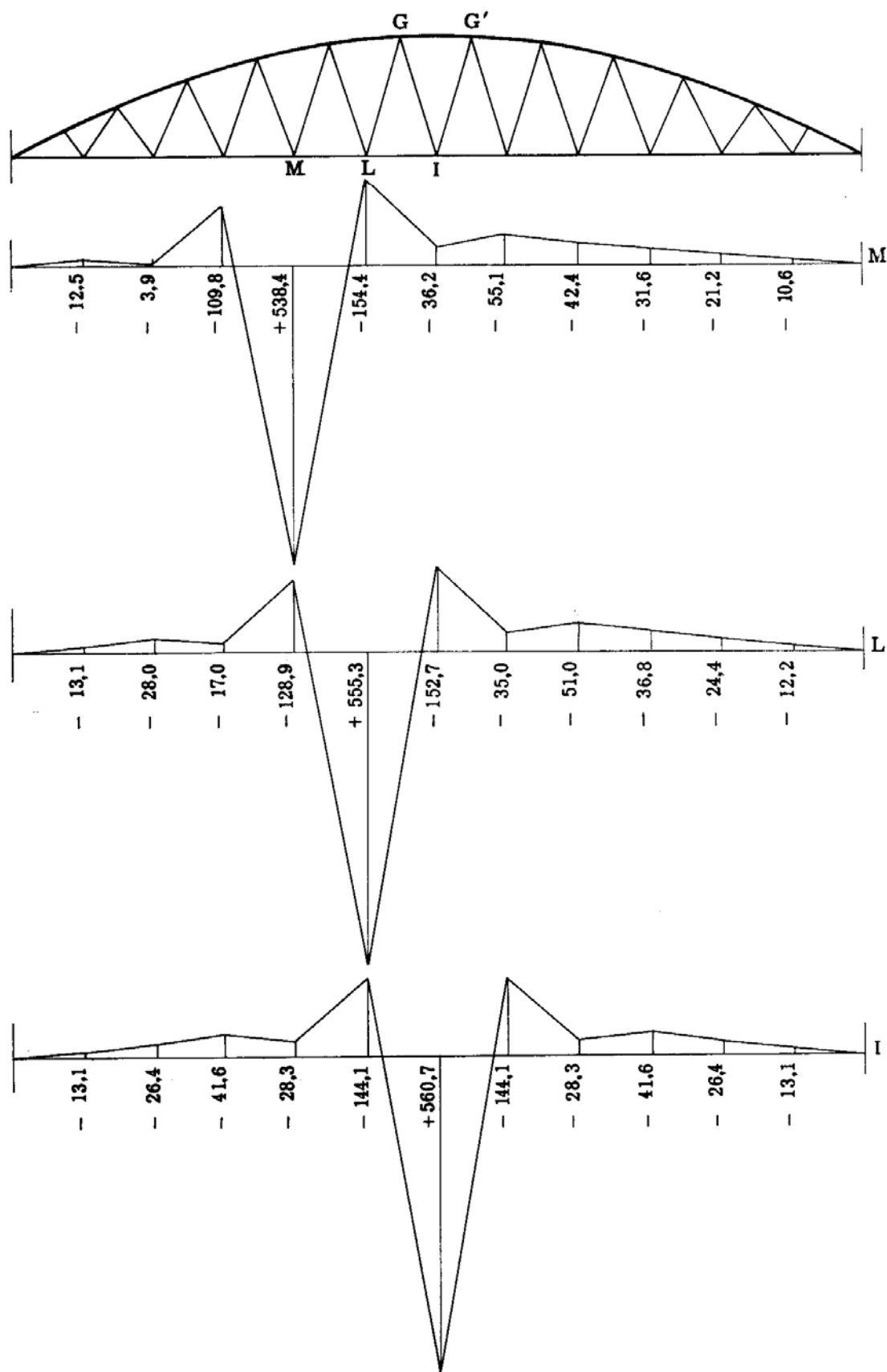


FIG. 11-52 d

ciaio Ø 60. Anche in questo caso la struttura è realizzata in una sola fase, ed i momenti del corrente inferiore sono affidati ai soli profilati. Nella fig. 11-50 sono riportati i momenti da peso proprio, calcolati esattamente con i lavori virtuali, e con il procedimento approssimato fino alla quarta

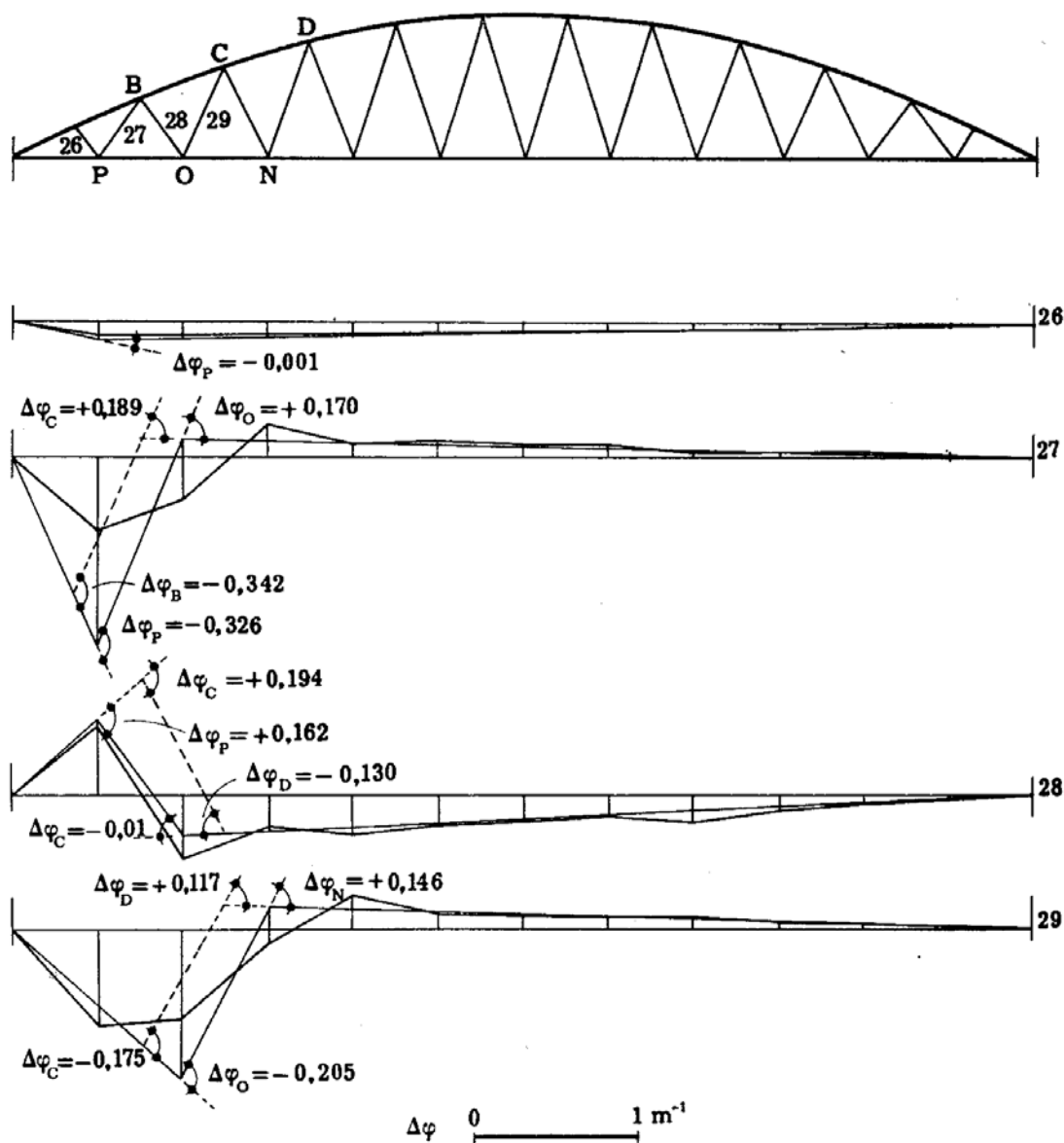


FIG. 11-53 a

approssimazione; nella fig. 11-51 i momenti dovuti al carico verticale di 1 t nel nodo O.

Si ha conferma di quanto già detto: l'errore è maggiore nelle grandi luci, e si è molto vicini al vero facendo la media tra i risultati della prima e della seconda approssimazione.

Con riferimento alla Nielsen della fig. 11-49, sono riportate (in m)

nella fig. 11-52 a b c d le linee d'influenza del momento nei nodi e nella fig. 11-53 a b c le linee d'influenza dello sforzo normale nelle aste di parete, calcolate esattamente. Si osserva da queste ultime che le aste 34 e 36 possono andare fuori causa. Il calcolo eseguito sulle relative strutture variate mostra però che vengono fuori dei momenti di valore inferiore ai

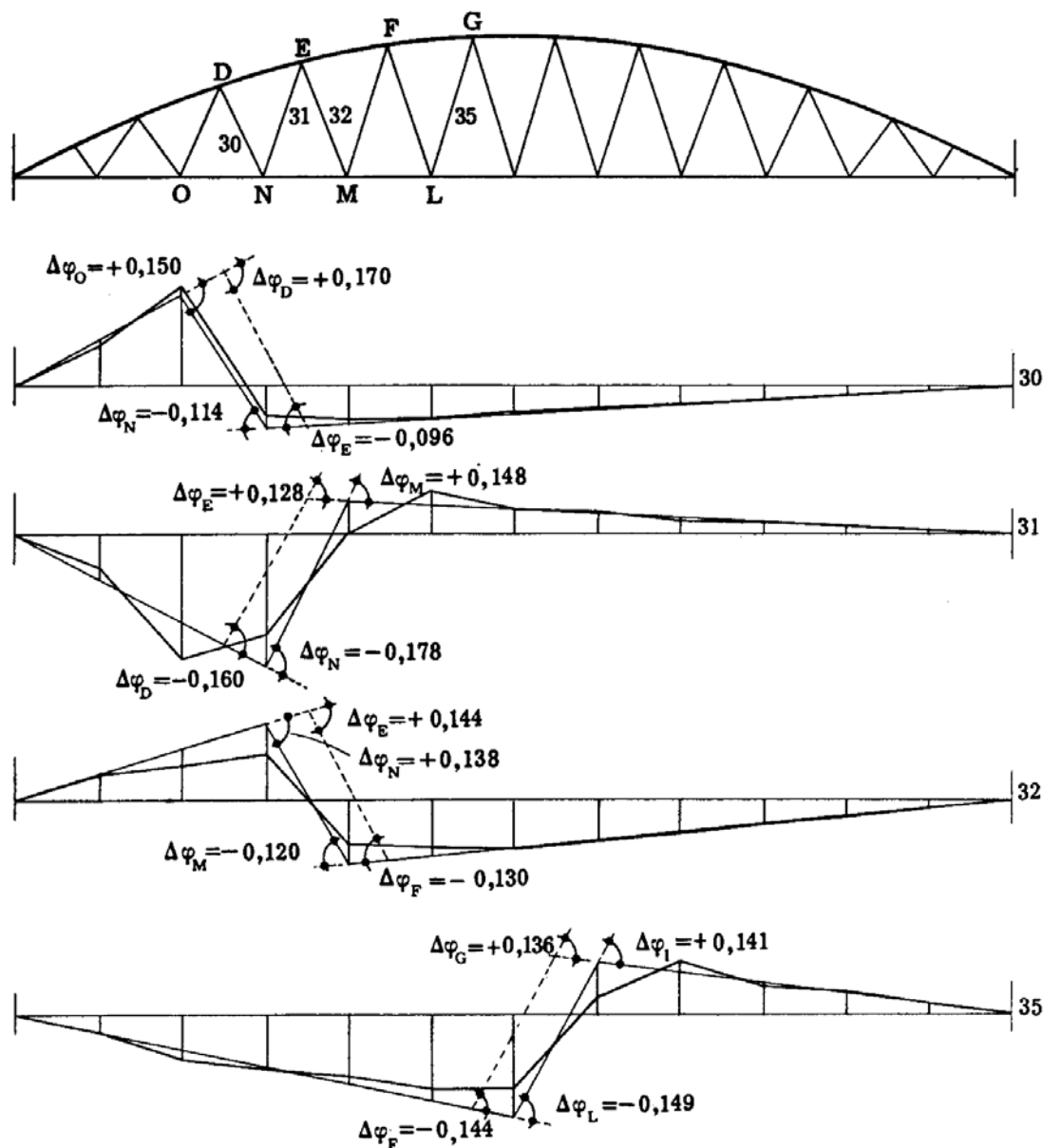


FIG. 11-53 b

massimi e minimi denunciati dalle linee d'influenza; quindi il diagramma  $M_{a \max} M_{a \min}$  resta nel caso in esame quello calcolato attraverso dette linee. Per l'arco è riportato in tm, nella fig. 11-54, il diagramma  $M_{\max} M_{\min}$ ; a titolo comparativo è disegnato nella stessa figura il diagramma  $M_{\max} M_{\min}$  per l'arco a due cerniere della stessa sezione, ed a sospensione verticale.

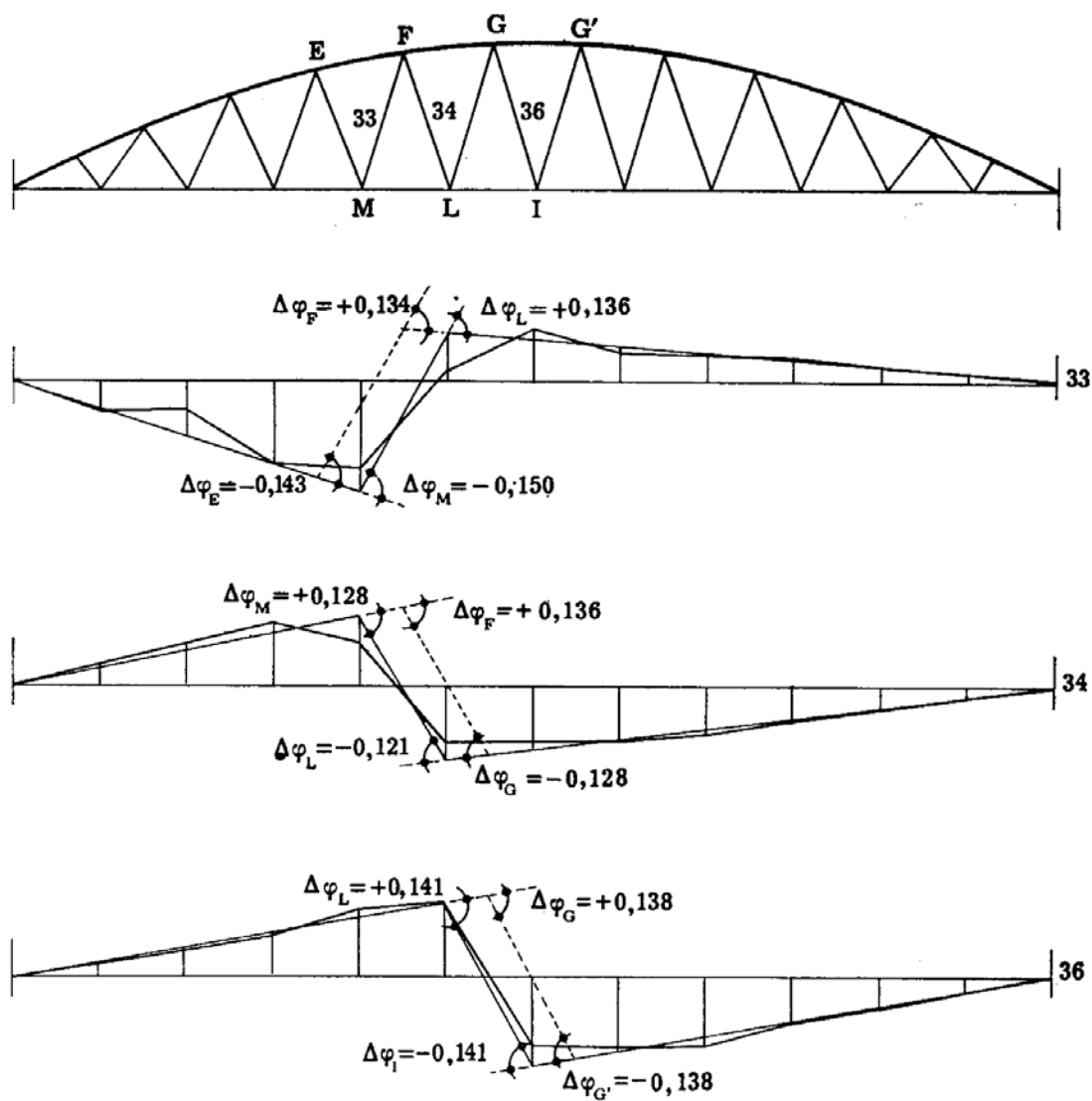
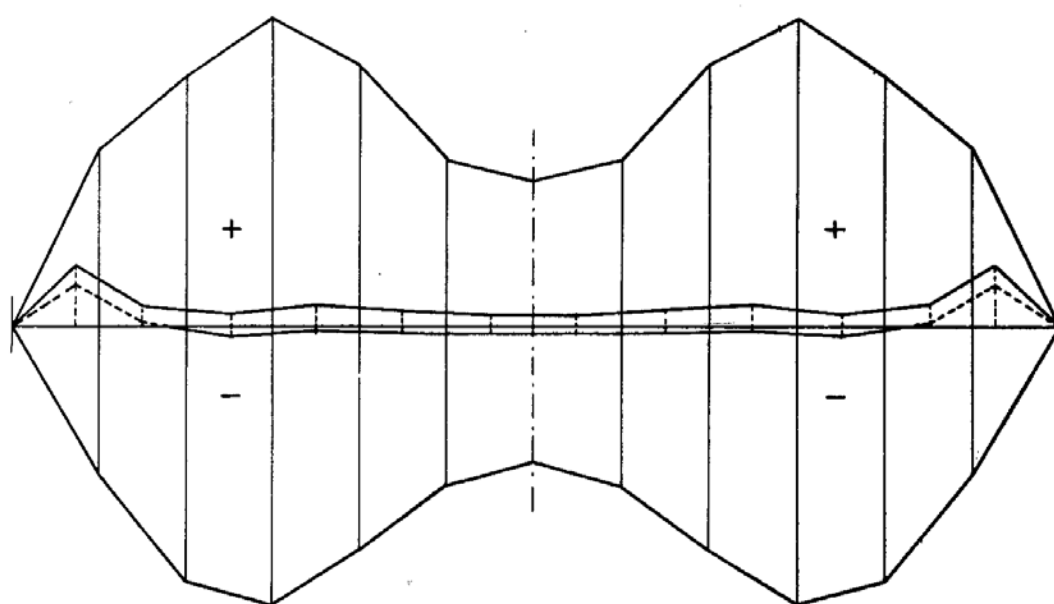


FIG. 11-53 c



0 100 200 tm

FIG. 11-54

Il carico accidentale che è stato usato nel calcolo è di 2,45 t/m su ogni arco; i diagrammi tengono conto anche dei momenti da peso proprio.

## 6. L'arco telaio.

Il problema del rispetto di una fascia limite ove debbano essere contenute le sottostrutture di un ponte può essere risolto — in maniera meno economica ma molto più vantaggiosa sul piano estetico — con lo schema ad *arco telaio*. Esso consiste (fig. 11-55) in un portale, con travata di se-

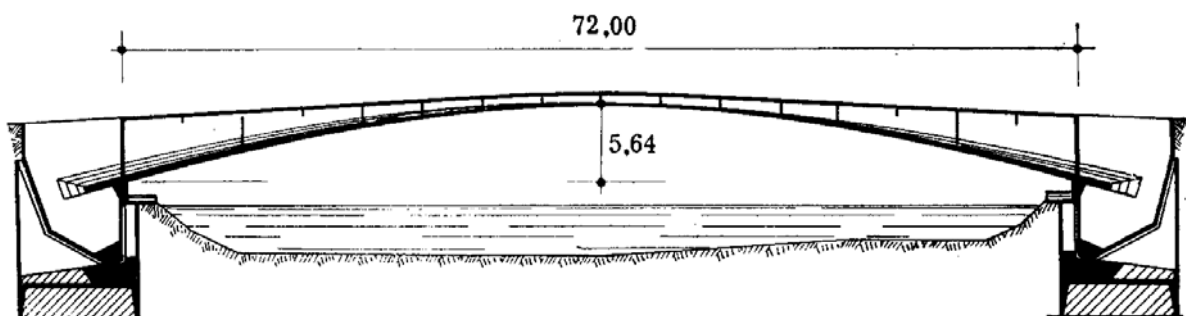


FIG. 11-55

Ponte di Mezzo (Pisa)

zione molto variabile, e ritti molto corti e robusti cernierati alla base. Il nome deriva dalla presenza della spinta, che fornisce il comportamento ad arco, e dei notevoli momenti flettenti da peso proprio, che danno il comportamento a telaio.

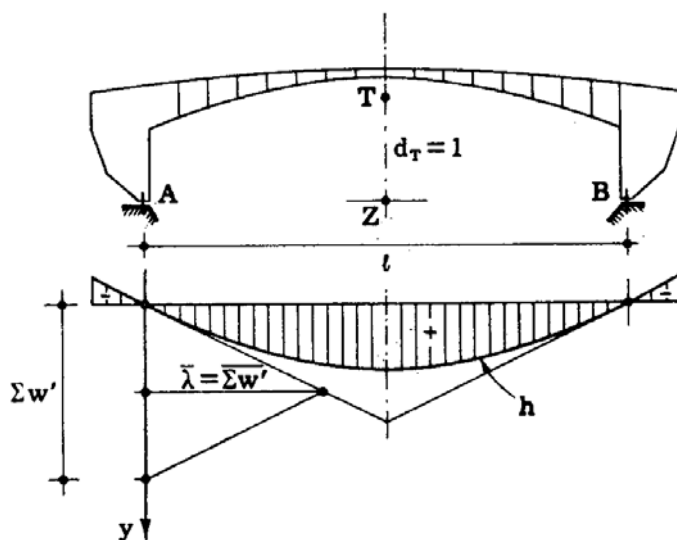


FIG. 11-56

La linea d'influenza  $h$  della spinta si disegna come nell'arco a due cerniere, considerando la sola elasticità dei tronchi della travata (fig. 11-56); caratteristico l'elevato valore di  $d_T$ , e le parti (lineari) di segno ne-

gativo della linea  $h$ . Quest'ultima circostanza porta a diminuire sensibilmente il valore della spinta da peso proprio, che potrebbe addirittura annullarsi se il peso del ritto è a ciò sufficiente; a volte, per avvicinarsi a questa condizione, molto benefica per le fondazioni, si zavorra il ritto stesso.

Spesso le due travate di accesso poggiano sull'estremità del portale (fig. 11-57); la linea  $h$  si completa in modo ovvio, e ci si avvicina maggiormente alla condizione di spinta nulla da peso proprio.

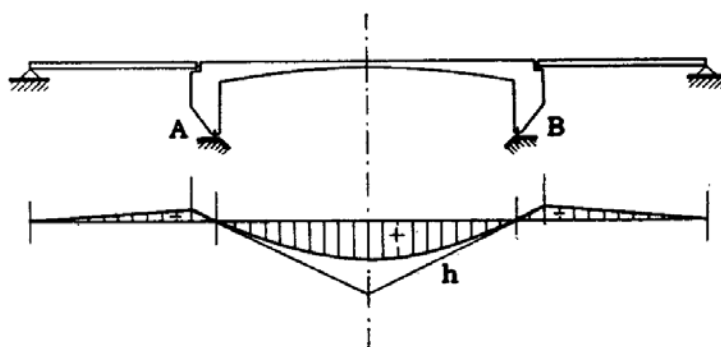


FIG. 11-57

Non è più da pensare neppure lontanamente all'asse della struttura come funicolare del peso proprio; le due curve sono molto distanti (fig. 11-58), ma si nota che i maggiori momenti da peso proprio si verificano dove le sezioni sono più alte.

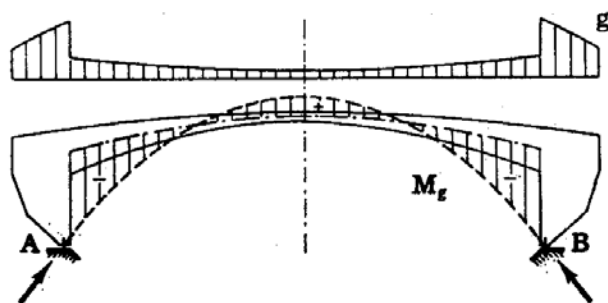


FIG. 11-58

Le linee d'influenza delle caratteristiche, una volta nota la  $h$ , si tracciano come nell'arco a due cerniere; nella fig. 11-59 sono riportate quelle del momento flettente e del taglio per una generica sezione S. Si osserva che le parti di linea relative ai ritti forniscono ulteriori contributi ai massimi e minimi delle caratteristiche, e quindi, agli effetti del carico accidentale, la presenza dei ritti è dannosa. Per la linea  $t_s$  si osservi che si pone  $\alpha_s = 0$ , e quindi essa coincide con quella della trave appoggiata.

Le linee si completano nel modo già detto se sono presenti travate di accesso appoggiate al portale.

I due ritti sono spesso nascosti, o camuffati da spalle; l'arco telaio

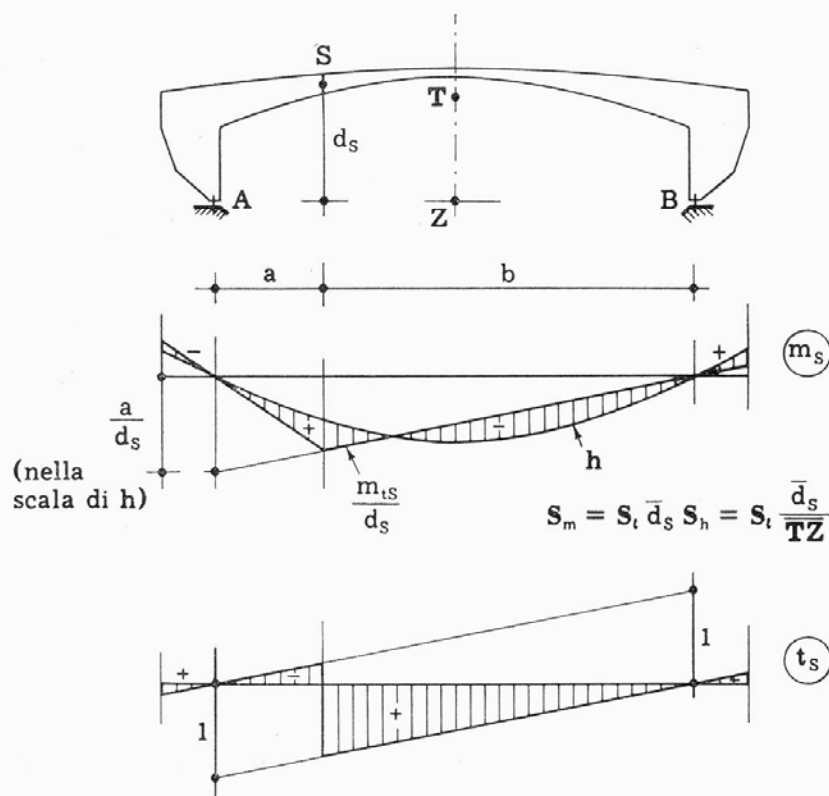


FIG. 11-59

assume così un mendace ma meraviglioso aspetto di arco snello estremamente ribassato, di sezione fortemente variabile.

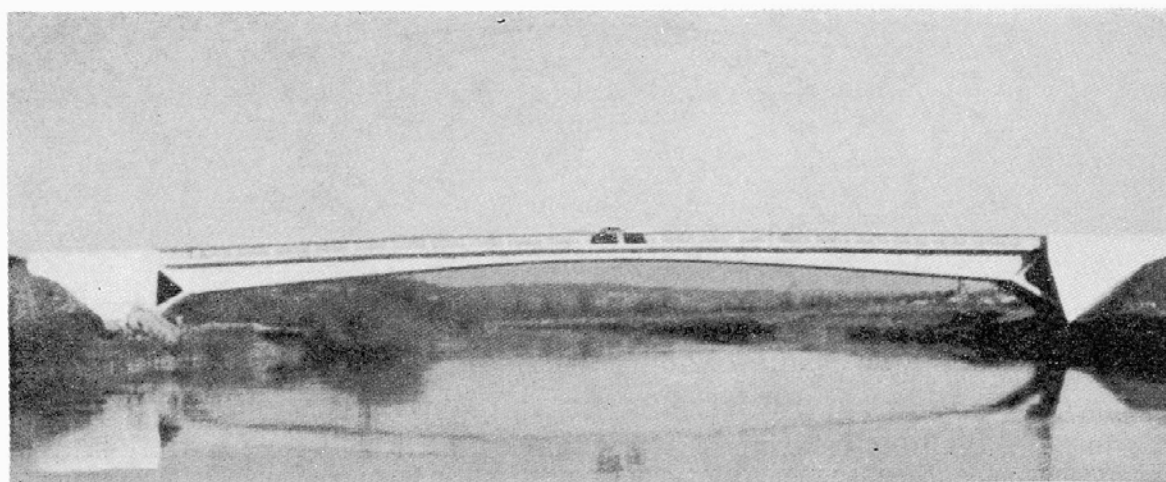


FIG. 11-60

(da Mörsch)

Notevole il ponte di Ussy sulla Marna, progettato da Freyssinet, di 74 m di luce (fig. 11-60).

Pregevolissima la ricostruzione del Ponte di mezzo, sull'Arno pisano, dovuta al Krall, di 72 m di luce e 5,64 m di freccia apparente, realizzata con centine autoportanti tipo Melan.

### 7. L'arco incastrato.

L'arco incastrato è la struttura che permette di superare le luci più forti; si cita il ponte di Traneberg in Svezia (1934) di 178,5 m di luce

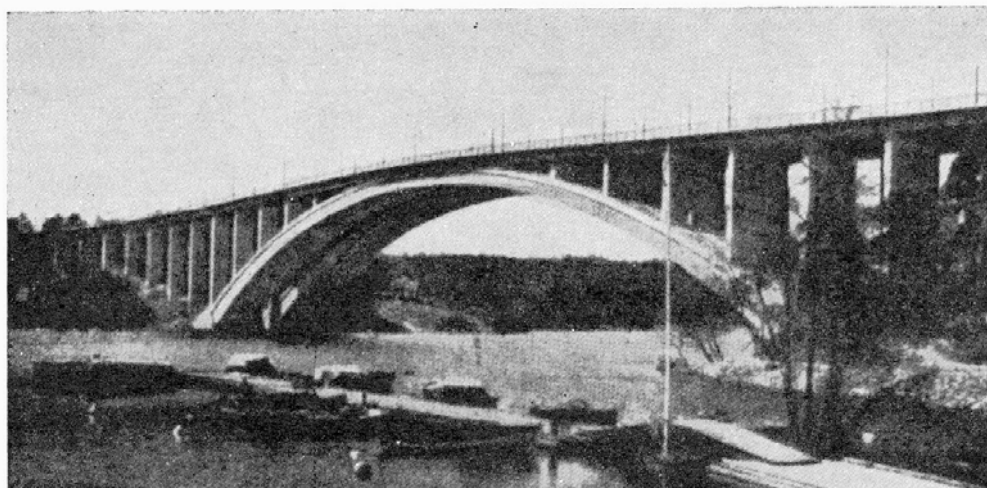


FIG. 11-61

(fig. 11-61), e quello di Sandö a Stoccolma (1943) di 264 m di luce e 45 m di freccia (fig. 11-62).

#### a) Linee d'influenza delle iperstatiche.

Le incognite iperstatiche sono tre, e possono essere scelte coincidenti con i momenti in chiave e alle imposte; la simmetria riduce le incognite a due.

La linea d'influenza  $m_A$  del momento  $M_A$  è consegnata nella fig. 11-63; in questa si vede la struttura svincolata in A, e la sezione A sottoposta ad una forza agente secondo l'antipolare  $a$  del baricentro di A rispetto all'ellisse di elasticità, con verso tale da imprimere una rotazione antioraria ad A.

La posizione della retta  $a$  è meglio sia ottenuta analiticamente; le sue coordinate rispetto al baricentro elastico O sono

$$OE = \frac{\rho_v^2}{OF}$$

$$OD = \frac{\rho_o^2}{OG}$$

dove  $\rho_v$  e  $\rho_o$  sono i semidiametri verticale ed orizzontale dell'ellisse di elasticità.

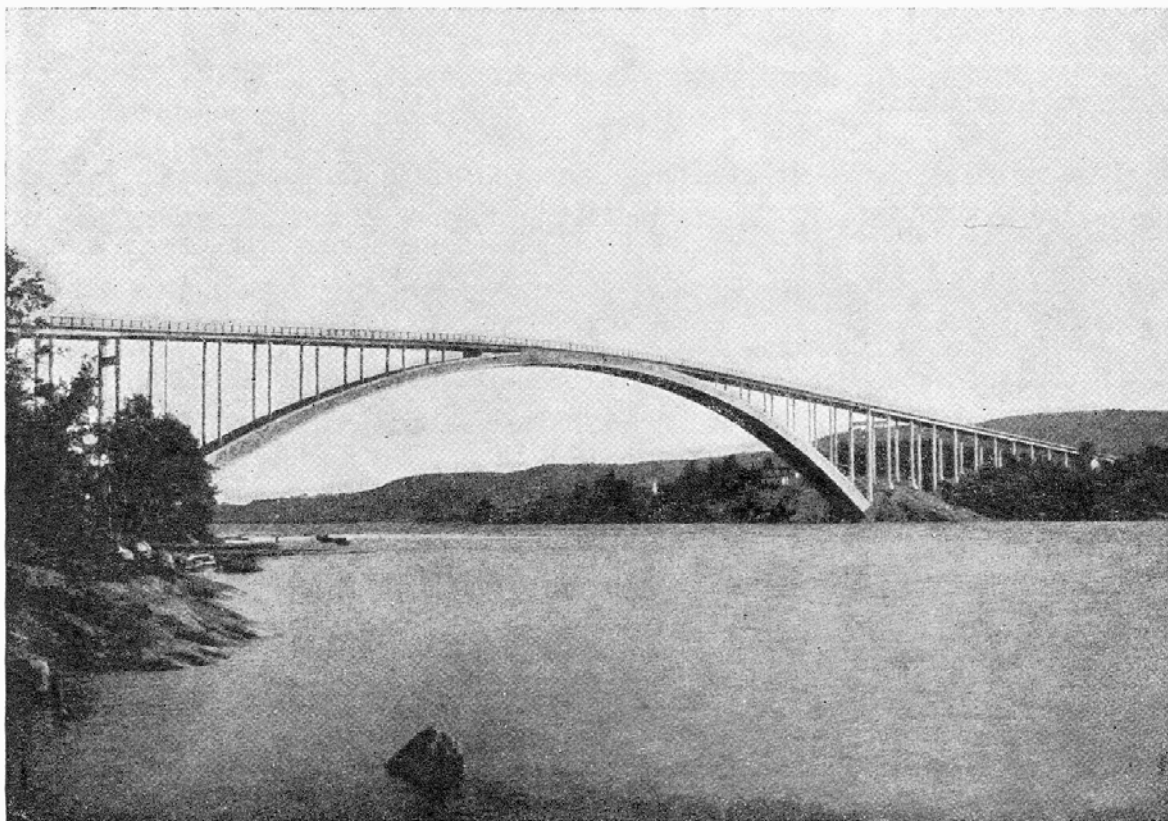


FIG. 11-62

La linea d'influenza è data dal diagramma delle componenti verticali

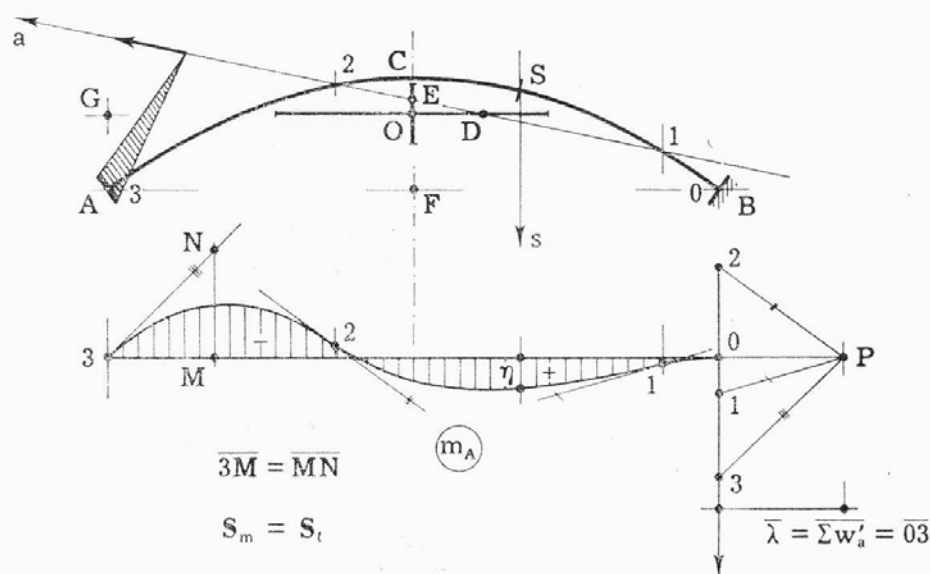


FIG. 11-63

degli spostamenti dei punti dell'asse provocati dalla forza sulla mensola

ACB incastrata in B. La deformata coincide infatti (a meno della scala) con quella provocata sull'arco da una distorsione  $D_\phi$  negativa in A (§ 4-12). Il procedimento per tracciare tale deformata è quello del § 1-9. La componente verticale  $\eta$  dello spostamento del baricentro della generica sezione S è fornita, in particolare, dal prodotto della forza prima determinata in retta d'azione per il momento centrifuga  $I_{as}^{SB}$  dei pesi elastici  $w$  compresi tra S e B rispetto alla retta  $a$  ed alla verticale  $s$  per il baricentro di S; il verso positivo di  $a$  è quello della forza applicata in A, il verso positivo di  $s$  è in basso. Diviso l'arco in conci di piccola lunghezza, si calcolano (è meglio farlo analiticamente) i momenti statici  $w'_a$  dei pesi elastici rispetto alla retta  $a$  ( $w'_a$  è positivo se il concio è alla sinistra di  $a$ ); si fanno agire tali momenti come vettori verticali applicati negli antipoli della retta  $a$  rispetto alle ellissi dei singoli conci, diretti verso il basso se positivi; si ordinano questi vettori così come si seguono sull'arco a partire dall'incastro B, e si connettono con un poligono funicolare (si ricordi che per avere distanza polare  $\lambda$  positiva il polo P si prende sulla sinistra della punteggiata dei vettori) a partire dalla verticale per B. Il segmento  $\eta$  compreso su  $s$  tra il primo lato del poligono ed il poligono stesso fornisce, a meno di una costante, il momento centrifugo  $I_{as}^{SB}$  di cui si è già detto. Non occorre calcolare il valore della forza; infatti si sa che l'inclinazione della linea  $m_A$  in A deve essere tale che  $3\overline{M} = \overline{MN}$  (fig. 11-63), se si vuole leggere la linea nella scala delle lunghezze (§ 4-7); basta, a ciò ottenere, assumere il polo P in modo che risulti  $\overline{0P} = \overline{03}$ .

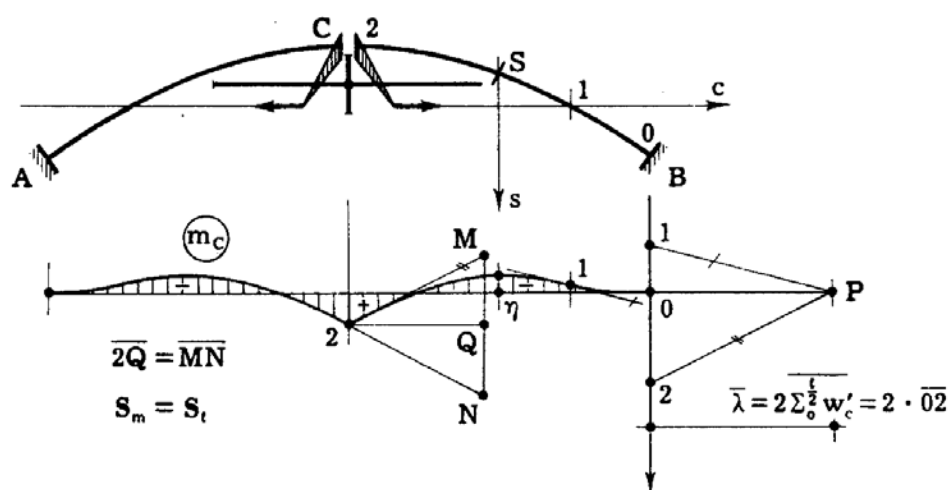


FIG. 11-64

In modo del tutto analogo si traccia la linea di influenza  $m_c$  del momento in chiave (fig. 11-64); tagliata la struttura in C, si applicano sulle due facce due forze uguali e contrarie agenti secondo l'antipolare

c di C. La costruzione della deformata può essere limitata, per simmetria, a mezzo arco CB; se si vuole leggere la linea nella scala delle lunghezze, basta far sì che  $2\overline{Q} = \overline{MN}$ , e cioè  $\overline{OP} = 2 \cdot \overline{OQ}$ .

b) *Linee d'influenza delle caratteristiche.*

La linea d'influenza della generica caratteristica si ottiene, una volta conosciute le tre linee  $m_A m_B m_C$ , con il procedimento delle linee d'in-

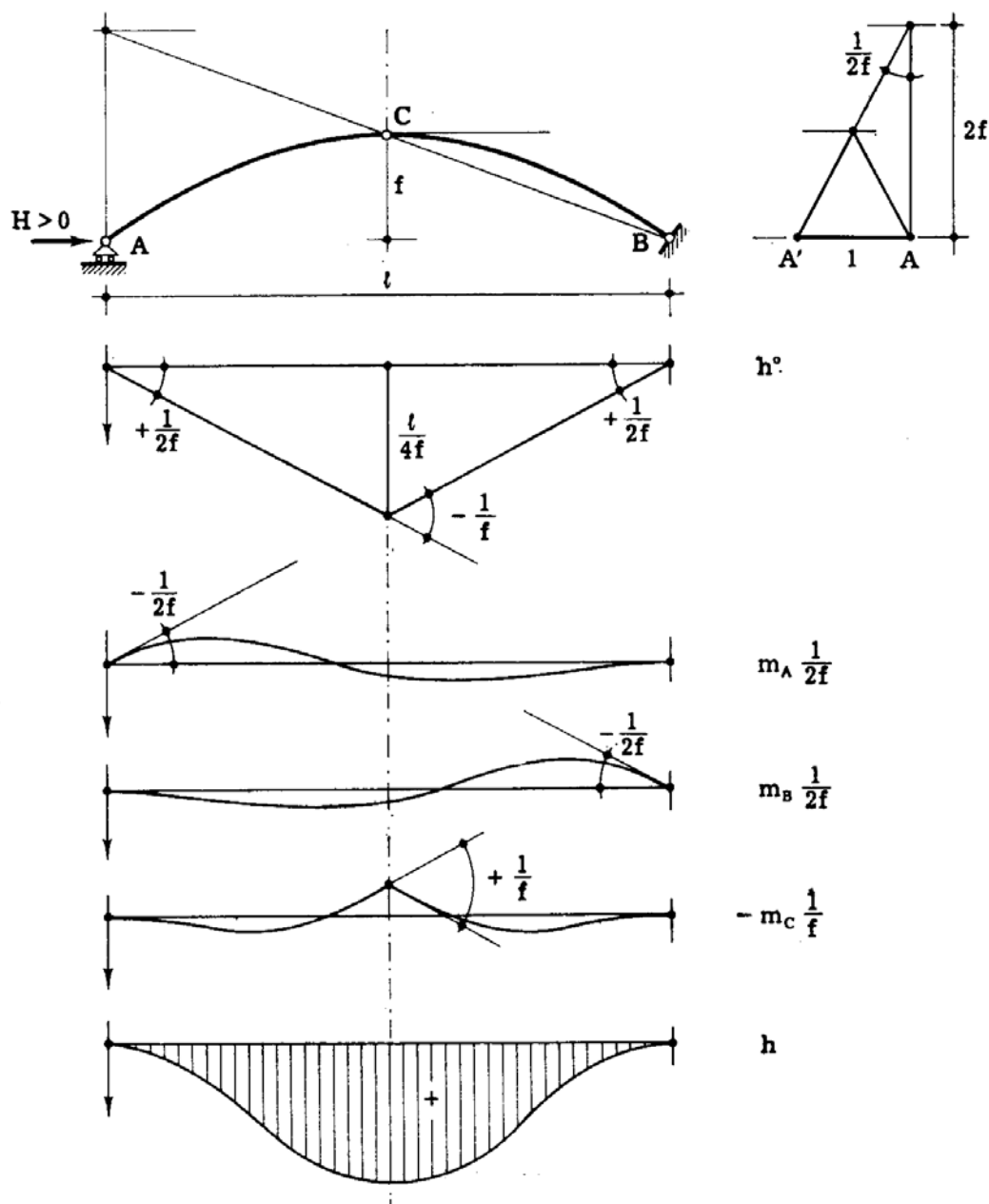


FIG. 11-65

fluenza fondamentali (§ 4-11). La costruzione di una linea d'influenza di momento è già riportata nella fig. 4-25; nelle figg. 11-65 e 11-66 sono ri-

portate quelle della spinta e della componente verticale della reazione

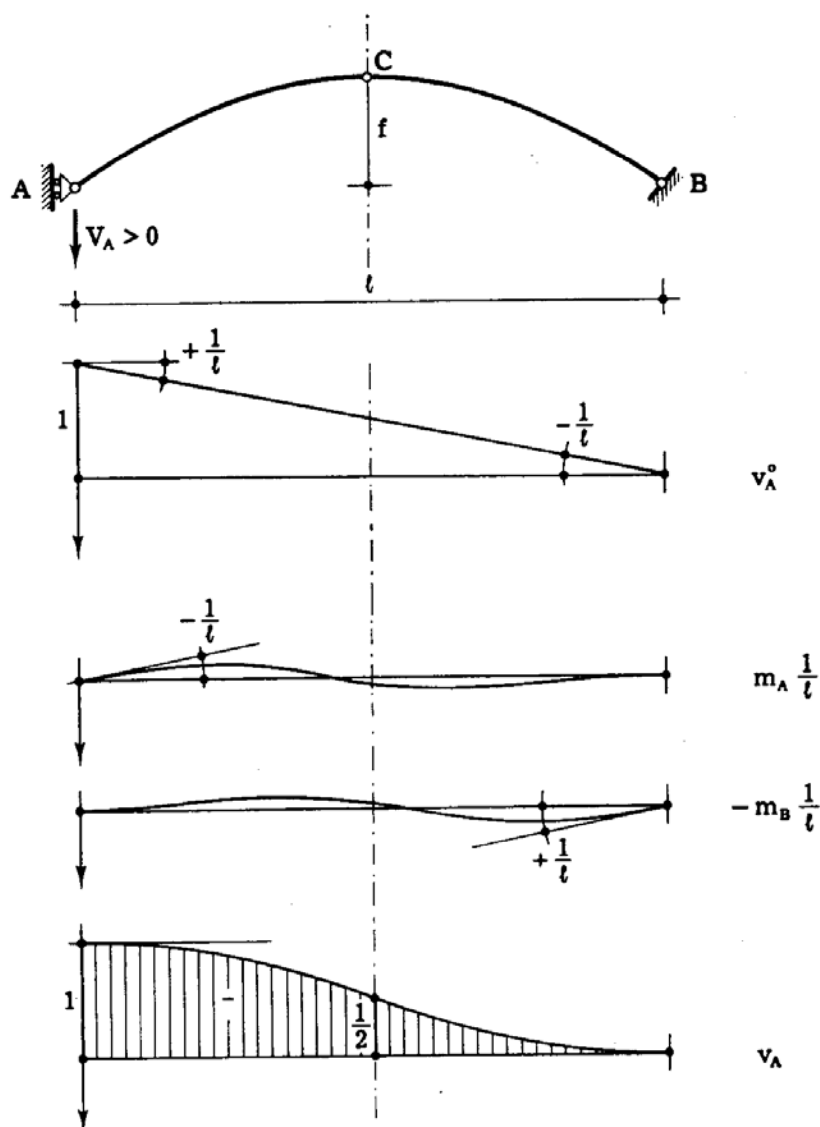


FIG. 11-66

in A. Si può ripetere, in tema di linee d'influenza del momento e del taglio, quanto già detto nel § 11-3 c, f.

c) *Linea delle intersezioni e linee inviluppo.*

Data una forza  $F$  verticale in posizione generica sull'arco, è immediato ottenere le due reazioni  $R_A$  ed  $R_B$  in valore e retta d'azione (fig. 11-67). Ripetendo la costruzione per più posizioni di  $F$ , si ottengono come punteggiata la curva luogo delle intersezioni delle due reazioni, e come inviluppi le due curve cui le reazioni sono in ogni caso tangenti. Sono queste la *linea delle intersezioni* e le *linee inviluppo*; esse, in analogia

a quanto già detto nel § 11-3 b per l'arco a due cerniere, sono utili per definire le stese di carico cui corrispondono in una generica sezione S i momenti massimo e minimo, baricentrico o di nocciolo (fig. 11-68). Per l'arco

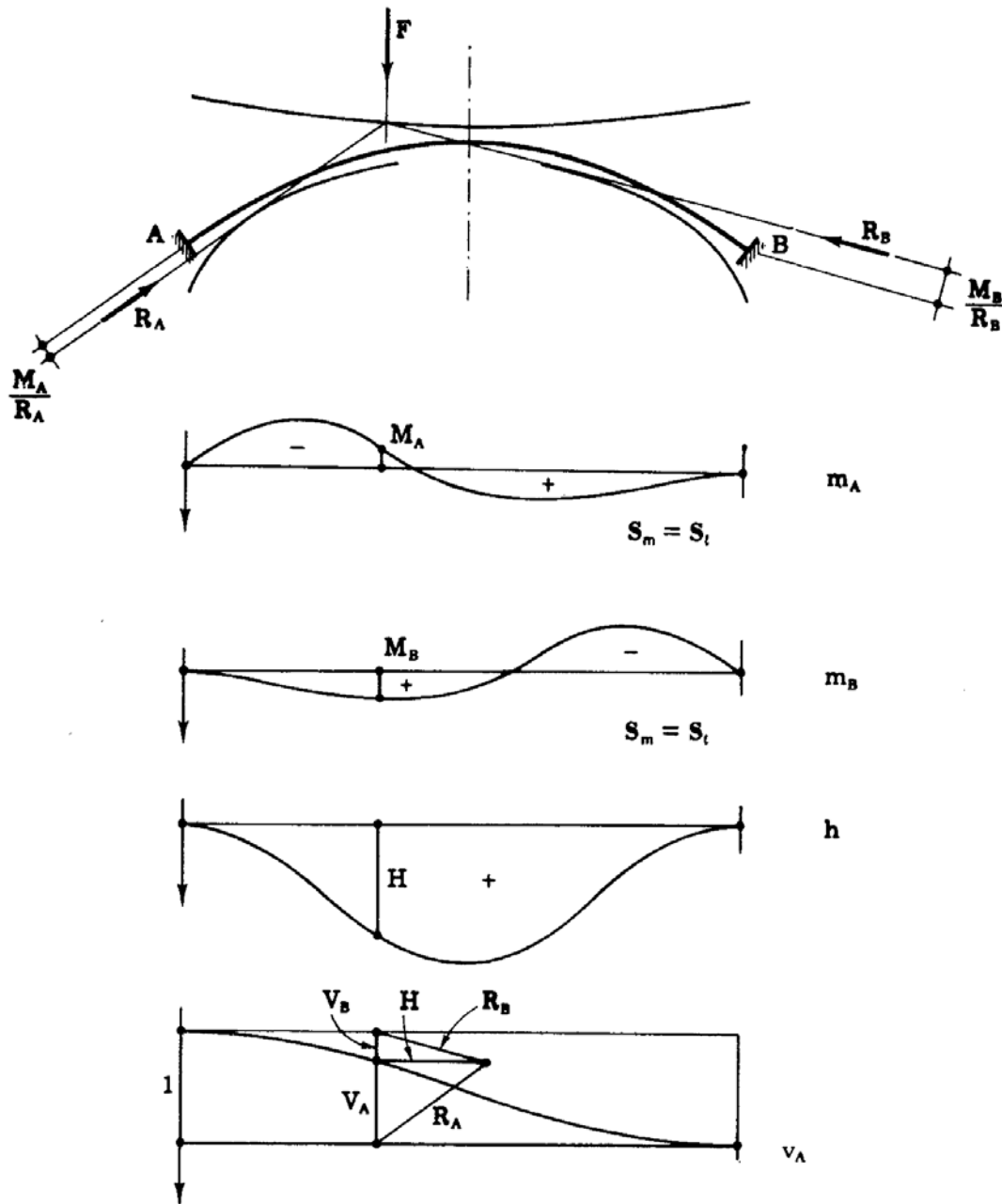


FIG. 11-67

a due cerniere le linee involuppo si riducono a due punti, e cioè ai baricentri delle due cerniere; per l'arco a tre cerniere la linea intersezione si

specializza nelle due rette AC e BC (fig. 11-19), limitate ai segmenti compresi tra le due verticali per A e B, e al disopra dell'orizzontale per C.

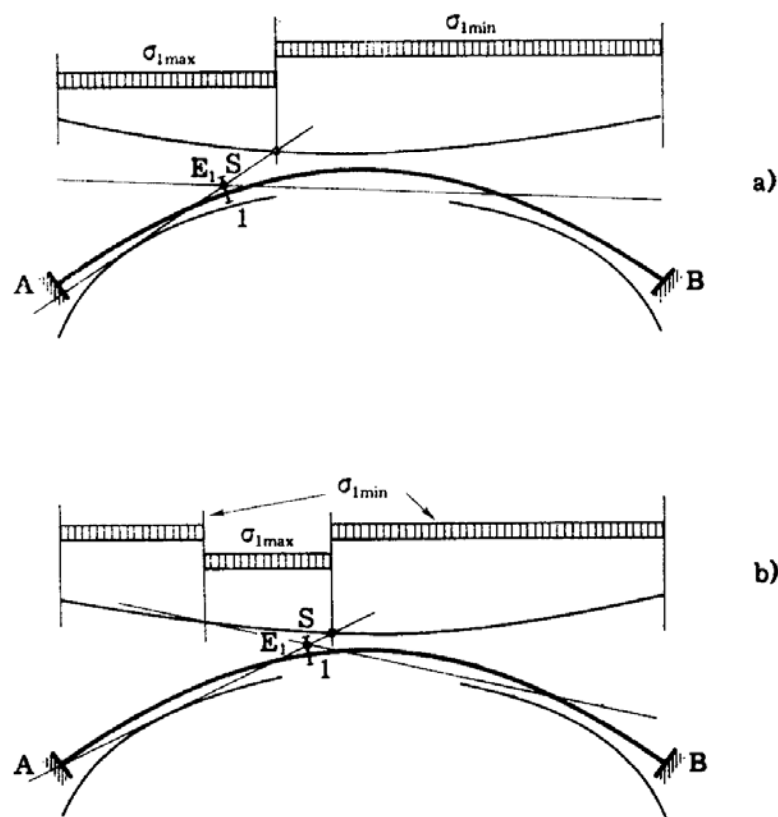


FIG. 11-68

d) *Le sollecitazioni da peso proprio, di ritiro, da variazioni termiche e da cedimenti vincolari.*

L'asse dell'arco è in genere una funicolare del peso proprio; con lo stesso ragionamento del § 11-3 d si dimostra che, se si trascura l'accorciamento da sforzo normale, il poligono delle successive risultanti coincide con l'asse dell'arco. L'accorciamento da sforzo normale provoca una caduta di spinta, che può calcolarsi con lo stesso procedimento di Mörsch già illustrato nel § 11-3 d. Si svincola l'arco in A (fig. 11-69 a); l'accorciamento della corda AB è fornito ancora da

$$\frac{H_g}{E} \int_s \frac{ds}{A}$$

La sezione A non ruota, e si sposta lungo la congiungente AB; per ricondurla al rispetto del vincolo occorre applicare in A (fig. 11-69 b) una forza  $\Delta_g H$  passante per il baricentro elastico O dell'arco, e diretta secondo l'orizzontale. Il valore di  $\Delta_g H$  fornito da

$$\Delta_g H \rho_v^2 \Sigma w = - \frac{H_g}{E} \int_s \frac{ds}{A}$$

da cui

$$\Delta_g H = - \frac{\frac{H_g}{E} \int \frac{ds}{A}}{\rho_v^2 \Sigma w}, \quad (32)$$

formula analoga alla (11-22).

I momenti  $M_g$  indotti dalla  $\Delta_g H$  sono forniti dalle ordinate dell'asse

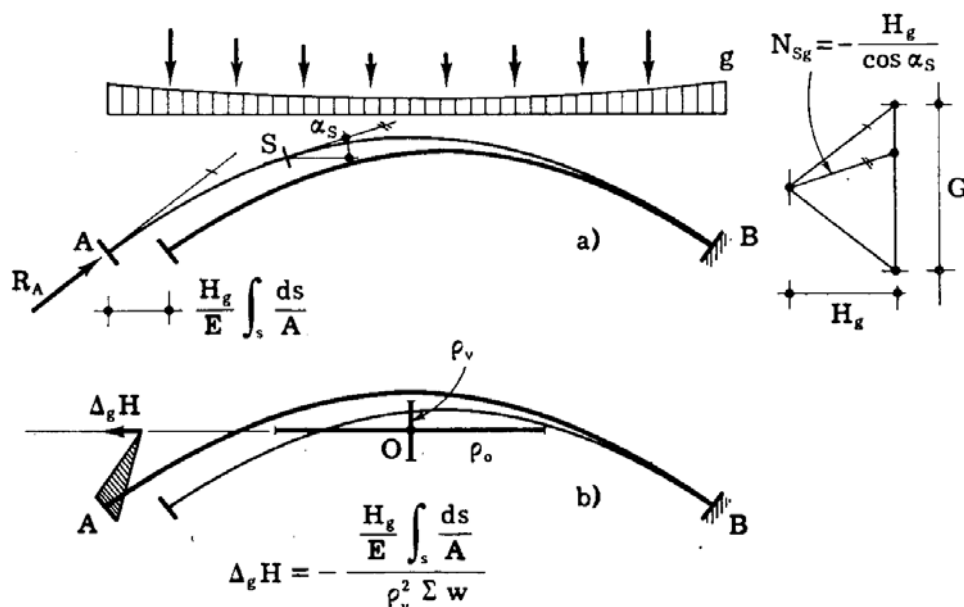


FIG. 11-69

dell'arco riferite all'orizzontale passante per il baricentro elastico, e moltiplicate per  $\Delta_g H$  (fig. 11-70 a); essi sono positivi al disopra e negativi al disotto della fondamentale. Il poligono delle successive risultanti si presenta come nella fig. 11-70 b, ed i momenti sono anche dati dalle ordinate comprese tra questo poligono e l'asse, moltiplicate per  $H_g + \Delta_g H$ .

I momenti  $M_g$  crescono linearmente all'aumentare dell'inerzia della sezione dell'arco, e al diminuire della monta, come si trae dalla (11-32) tenendo conto che, diminuendo la monta,  $\rho_v^2$  diminuisce con legge quadratica, ma diminuiscono anche le ordinate dell'asse, con legge lineare.

Una variazione termica uniforme  $\Delta t$  induce una spinta addizionale

$$\Delta_t H = \frac{\alpha l \Delta t}{\rho_v^2 \Sigma w}; \quad (33)$$

il ritiro è assimilabile ad una diminuzione di temperatura; un cedimento orizzontale  $\Delta l$  tra le imposte, positivo se di avvicinamento, si associa ad

una spinta addizionale

$$\Delta_c H = \frac{\Delta t}{\rho_v^2 \Sigma w} \quad (34)$$

Gli effetti della variazione termica, del ritiro e dei cedimenti oriz-

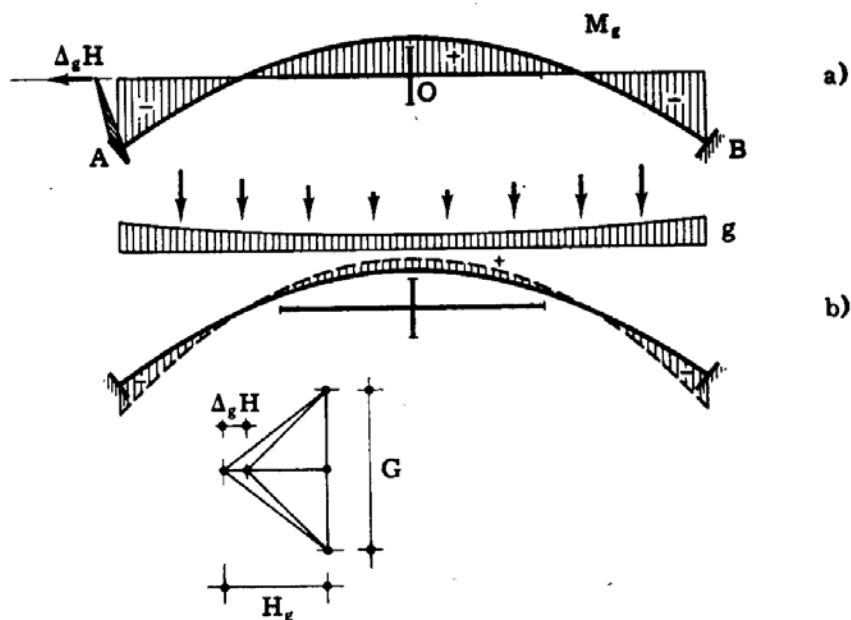


FIG. 11-70

zontali sono identici a quelli dell'accorciamento da sforzo assiale, e si

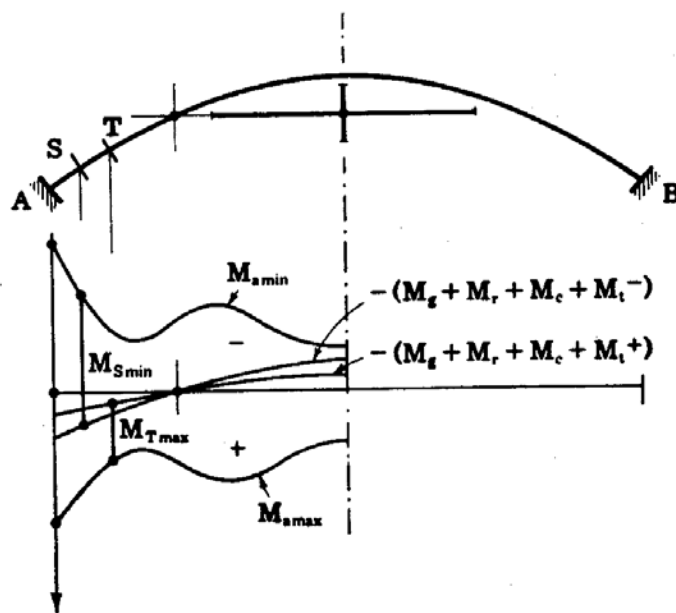


FIG. 11-71

calcolano nella stessa maniera; si badi bene però — e questo soprattutto agli effetti della viscosità, come si avrà occasione di precisare — che le

cause sono ben diverse, essendo le prime delle distorsioni, e la seconda una forza.

Circa la pericolosità dei momenti da peso proprio e simili, e le possibilità di riduzione, vale integralmente quanto già detto nel § 11-3 d, e.

Nella fig. 11-71 è riportato l'aspetto dei diagrammi  $M_{a \max}$  ed  $M_{a \min}$ , unitamente a quello dei diagrammi  $M_g$ ,  $M_r$ ,  $M_c$  ed  $M_t$ .

## 8. L'arco Boussiron-Vallette.

In genere in un arco incastrato le sezioni, e con esse i loro momenti d'inerzia, aumentano dalla chiave alle imposte; ciò è in relazione all'aumento nello stesso senso dello sforzo normale. Adottando però una legge di variazione inversa per i momenti di inerzia, si conseguono vantaggi nei riguardi dei momenti da peso proprio, variazioni termiche, ritiro e cedimenti. Prototipo di questo tipo di struttura è il ponte di La Roche-Guyon sulla Senna (1934) di 161 m di luce (fig. 11-72).

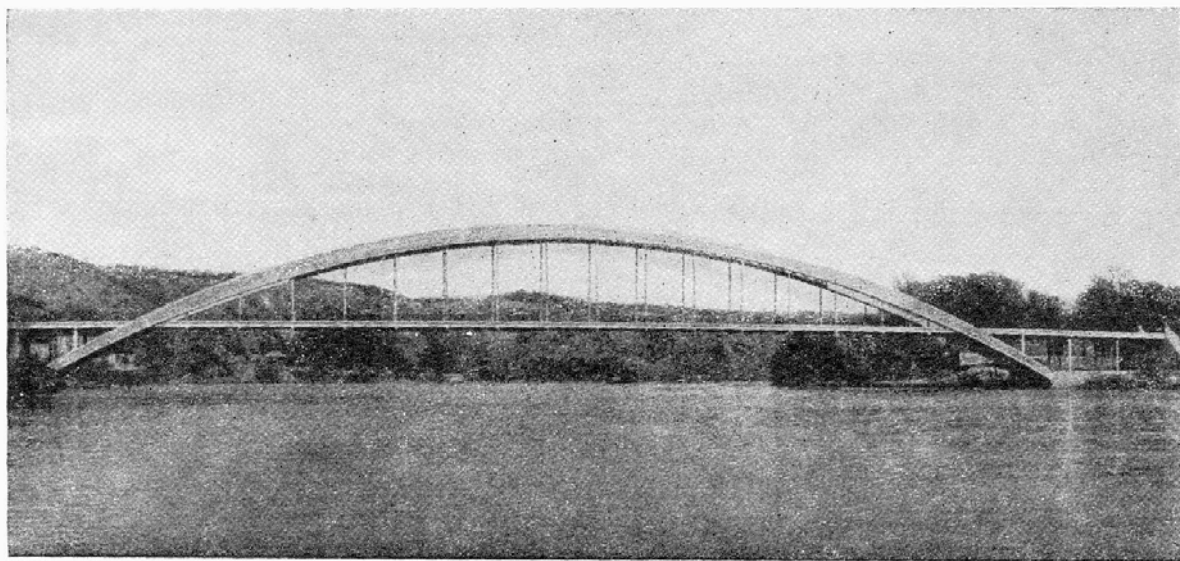


FIG. 11-72

In un arco tipo Boussiron il baricentro elastico è più in basso di un arco normale, ed il raggio  $\rho_v$  è più elevato. Il primo effetto è intuitivo, poichè, a parità di peso elastico complessivo, nell'arco Boussiron i pesi elastici più elevati sono ubicati presso le zone di imposta. Un po' meno immediata è la giustificazione del secondo effetto. Si esegua sempre il paragone a parità di peso elastico totale; per fare un esempio semplice, si passi dall'arco classico al Boussiron attraverso una serie di operazioni consistenti ciascuna nel trasferire un peso elastico elementare  $dw$  dalla quota  $h$  alla quota  $-h$  rispetto alla retta  $g^*$  che biseca la freccia (fig. 11-

73). In questa operazione il momento d'inerzia rispetto all'orizzontale  $g$

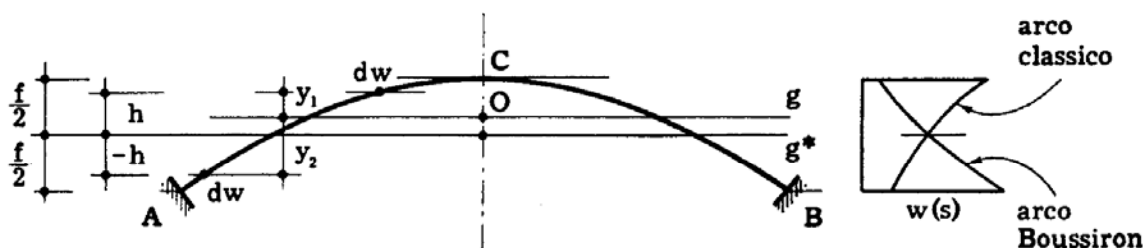


FIG. 11-73

passante per il baricentro elastico  $O$  varia, a meno di quantità del secondo ordine in  $dw$ , di

$$dI_g = - dw (y_1^2 - y_2^2),$$

dove  $y_1$  ed  $y_2$  sono le distanze di  $dw$  da  $g$  prima e dopo il trasferimento. In un arco classico il baricentro elastico si trova al disopra del punto medio della freccia; è perciò  $|y_2| > |y_1|$ , e  $dI_g > 0$ . Ciò finchè il baricentro elastico, operando i suddetti trasferimenti, raggiunge il suddetto punto medio. Questa è la situazione, nel caso preso in esame, che offre il massimo  $\rho_v$ .

Dalle (11-32), (11-33) e (11-34) si osserva che la caduta di spinta, e con essa i momenti, diminuisce quadraticamente all'aumento di  $\rho_v$ ; l'effetto sui momenti è ancora più cospicuo nelle zone di imposta, dove diminuisce la distanza da  $\Delta H$ , conseguentemente all'abbassamento del baricentro.

## 9. L'arco-trave tipo Risorgimento.

Una realizzazione che ha dell'arco e della trave incastrata è quella della fig. 11-74; si tratta di una struttura cellulare, costituita da due solette, una curvilinea di intradosso ed una di estradosso funzionante anche da impalcato, collegata da due o più pareti longitudinali continue (timpani), il tutto incastrato in robuste fondazioni su cassoni o su pali. Una o più pareti trasversali solidarizzano ulteriormente le varie parti della struttura. Questo tipo di ponte si può presentare su fiumi dalle rive basse, in ambienti dove non sia consentita sovrastruttura; e cioè nelle stesse condizioni che possono consigliare l'arco-telaio. La particolarità dello schema non risiede certo nella cellularità; molti ponti di un certo respiro, a tre cerniere, a due, incastrati, archi telai etc. sono di questo tipo. Ciò che lo personalizza è piuttosto il comportamento in un certo